

대기 중 휘발성 유기화합물의 광산화 공정 및 광촉매산화 공정의 처리효율 비교

A Study on the Photolytic and Photocatalytic Oxidation of VOCs in Air

서 정 민¹⁾ · 정 창 훈 · 최 금 찬
동아대학교 지구환경공학부, ¹⁾밀양대학교 환경공학과
(2001년 6월 4일 접수, 2002년 3월 14일 채택)

Jeong-Min Suh¹⁾, Chang-Hoon Jeong and Kum-Chan Choi
Division of Earth & Environmental Engineering, Dong-A University
¹⁾*Dept. of Environmental Engineering, Miryang National University*
(Received 4 June 2001; accepted 14 March 2002)

Abstract

Both UV Photolysis and Photocatalytic Oxidation Processing are an emerging technology for the abatement of Volatile Organic Compounds (VOCs) in atmospheric-pressure air streams. However, each process has some drawbacks of their own. The former is little known as an application for air pollution treatment, so it has been a rare choice in the field. Therefore we have to do more experiment and study for its application for treatment of VOCs. Although the latter has been used in the industrial fields, it still has a difficulty in decomposing high concentrations of VOCs. To solve these problems, we have been studying simultaneous application of those two technologies. We have studied the effects of background gas composition and gas temperature on the decomposition chemistry. It has shown that concentration of TCE and B.T.X., diameter of reactor, and wavelength of lamp have effects on decomposition efficiency. When using Photolysis Process only, the rates of fractional conversion of each material are found at TCE 79%, Benzene 65%, Toluene 68%, Xylene 76%. In case of Photocatalytic Oxidation Process only, the rates of fractional conversion decreased drastically above 30 ppm. When there two methods were combined, the rates of fractional conversion of each material are enhanced such as TCE 93%, Benzene 75%, Toluene 81%, Xylene 90%. Therefore, we conclude that the combination of Photolysis-Photocatalytic Oxidation process is more efficient than each individual process.

Key words : trichloroethylene, TCE, photocatalyst, photolysis, catalyst titanium dioxide, anatase

1. 서 론

* Corresponding author
Tel : +82-(0)51-200-7680, E-mail : kcchoi@daunet.donga.ac.kr

휘발성 유기화합물 (Volatile Organic Compounds : VOCs)은 각종 산업체에서 많이 사용되고 있는 용

매와 화학 및 제약공장 플라스틱의 건조공정에서 배출되는 유기가스 등까지 매우 다양하며, 저비점 액체연료, 파라핀, 올레핀, 방향족 화합물 등으로 우리 생활주변에서 흔하게 사용된다. VOCs는 대기 광화학 반응을 통하여 오존(O₃) 등 2차 오염물질을 다양하게 생성시키며, 인간의 주변환경 및 건강에 직·간접적으로 유해한 영향을 미치고 있어 현재 휘발성 유기화합물에 대한 관심이 날로 증대되고 있다(조정구, 1999).

VOCs 처리기술은 배출시설등에서 고농도 배출가스를 정화하기 위한 직접연소설비, 촉매산화설비, 용제회수설비 등 주로 고농도의 VOCs의 처리를 위하여 개발이 진행, 보급되어 왔다. 최근 국내의 VOCs 규제법안은 광화학 옥시던트의 발생을 줄이기 위하여 도장이나 인쇄시설같이 저농도 고유량 배출업종에 대해서도 규제대상에 포함시키고 있다. 비교적 저농도이며 유량이 큰 배출가스를 처리할 때에 종래의 연소법이나 회수법을 적용하는 경우는 설비비 및 운전비가 높아 비경제적이다. 따라서, 다양한 배출원이 증가됨에 따라, 중 저농도 배출가스 처리 방지산업의 규모가 확대되고 있으며 기술개발도 이에 맞추어 진행되고 있다.

본 연구는 실제 작업현장에서 인체 및 환경에 위해를 가져올 수 있는 유기용제 중 다량으로 발생하는 트리클로로에틸렌(trichloroethylene)과 benzene, toluene, xylene을 처리대상물질로 선정하고, UV 광

산화공정과 광촉매산화공정을 각각 적용하여 비교하였으며, 이들 오염물질의 동시처리에 대한 실제 현장적용 가능성을 평가하였다. 또한, 안정한 처리효율을 가지는 반응기의 설계인자 및 처리효율을 향상시킬 수 있는 방안으로 UV 광산화-광촉매 반응기의 적용 가능성 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1 UV 광산화와 TiO₂ 광촉매 기술

현재 국내외적으로 이루어지고 있는 UV 광산화와 TiO₂ 광촉매산화에 관련된 연구들을 살펴보면, Haag and Johnson (1996)는 UV 광원으로 xenon flashlamp를 사용하여 휘발성 유기화합물을 광산화하는 새로운 공정에 대하여 연구하였다. 이 연구에선 처리대상물질로 TCE를 선정하여 1~30 Hz의 주파수, 33~60°C의 온도에서 실험한 결과 TCE의 제거율이 99% 이상인 것으로 확인되었다. Okamura *et al.* (1994) 수중의 TCE를 폭기법에 의해 기상으로 이행시켜 기상의 TCE를 주파장 254 nm 저압수은램프로 광분해하였고, 이 연구에서 tygon tube와 teflon tube를 사용할 때의 TCE 감소율을 시험하였다. Glaze *et al.* (1993)은 PCE와 TCE 용액의 분해메카니즘을 pyrex-filtered xenon radiation (>290 nm)와 TiO₂ 광촉매를 이용하는 재순환 반응기로 연구하였

Table 1. Products from photocatalysis of chlorinated ethanes and their degradation products.

Compound subjected to photocatalysis		Products identified from photocatalysis (including traces)			
CHCl ₂ -CH ₃	(1, 1-DCE)	CH ₃ COOH	CH ₂ ClCOOH	CO ₂	HCl
CH ₂ Cl-CH ₂ Cl	(1, 2-DCE)	CH ₂ ClCOOH	CH ₂ ClCHO	CO ₂	HCl
CCl ₃ -CH ₃	(1, 1, 1-TriCE)	CH ₂ ClCOOH		CO ₂	HCl
CHCl ₂ -CH ₂ Cl	(1, 1, 2-TriCE)	CH ₂ ClCOOH	CHCl ₂ COOH	CO ₂	HCl
CCl ₃ -CH ₂ Cl	(1, 1, 1, 2-TetCE)	CHCl ₂ COOH	CCl ₃ CHO · H ₂ O	CO ₂	HCl
CHCl ₂ -CHCl ₂	(1, 1, 2, 2-TetCE)	CHCl ₂ COOH		CO ₂	HCl
CCl ₃ -CHCl ₂	(PenCE)	CCl ₃ COOH		CO ₂	HCl
CH ₃ COOH		HCOOH		CO ₂	
CH ₂ ClCOOH		(COOH) ₂	CHO-COOH	CO ₂	HCl
CHCl ₂ COOH		(COOH) ₂		CO ₂	HCl
CCl ₃ COOH		(COOH) ₂		CO ₂	HCl
CH ₂ ClCHO		CH ₂ ClCOOH	HCOOH	CO ₂	HCl
CCl ₃ CHO · H ₂ O		CCl ₃ COOH	CHCl ₂ COOH	CO ₂	HCl
HCOOH		(COOH) ₂		CO ₂	
(COOH) ₂				CO ₂	

* Mao *et al.* (1993)

는데, 각각의 Chloroalkene (CA)의 광촉매 분해로부터 기존에 보고되지 않았던 DCAA (dichloroacetic acid), TCAA (trichloroacetic acid), 그리고 DCAAD (dichloroacetaldehyde)같은 부산물들이 관찰되었다. Uchida *et al.* (1998)은 film 형태의 TiO₂를 이용하여 trichlorobenzene의 분해에 대한 연구를 보고하는 등의 촉매 개발에서부터 VOCs 처리에 이르기까지 광촉매에 대한 연구가 활발하게 진행되어지고 있다.

TCE의 분해 생성물들은 많은 양이 발생되는 HCl외에도 우선적으로 유기산이 가장 두드러진 생성물이다. 이들 유기산의 TiO₂ 광촉매 작용은 많은 HCl과 CO₂를 생성시킨다. 또한 적은 양의 포름산과 옥살산이 형성된다. chlorinated ethanes의 광산화-광촉매 작용에서 관찰되는 non-ionic organic products는 주로 aldehydes이다. 이 화합물은 첫 단계에서 각각의 산으로 분해되는 것으로 알려져 있고 다양한 chlorinated ethanes과 그것의 mineralization 경로상의 중간체로부터 밝혀진 생성물에 관한 내용은 표 1에 나타내었다.

3. 실험 및 방법

3.1 실험 방법

본 실험은 UV 광산화 단독공정과 TiO₂ 광촉매 산화 단독공정시 VOCs 처리율을 비교실험하기 위하여 quartz filter tube, pyrex filter tube를 교체하면서 실험하였으며, 반응기내에 TiO₂를 코팅시킨 스테인레스 tube를 탈부착시키며 실험함으로써 UV 광산화-TiO₂ 광촉매 산화 복합공정시의 처리효율과도 비교하였다.

본 실험에서는 광산화 단독공정의 실험을 위하여 64watt 저압수은 램프를 사용하여 오존생성능을 측정하고, 농도 및 유량변화에 따른 B.T.X.의 처리효율을 고찰하였으며, 광촉매 단독공정의 실험을 위하여 pyrex filter tube를 사용하여 290 nm 이상에서 B.T.X.의 광촉매 산화 실험을 수행하였다. UV 광산화-TiO₂ 광촉매 산화 복합공정의 실험을 위하여 반응기내에 TiO₂를 코팅시킨 스테인레스 tube를 부착시키고 quartz filter를 사용하여 180 nm 이상에서의 광촉매 산화와 광분해 반응을 실험하였다. 실험은 온도 20±5°C, 습도 70±20%의 조건하에서 수행되었다.

3.2 모의가스의 제조

본 실험의 처리대상가스로는 유기용제 중 작업장에서 다량으로 배출되는 B.T.X.를 선정하였으며, test gas의 제조는 N₂ 가스 (99.999%) 및 dry air gas bomb에 미세유량계를 장치하여 각각의 diluted gas를 tedlar bag으로 정량 유입시키는 방법을 사용하였다.

Air Sampling Standard Method를 이용하여 TCE와 B.T.X.용액을 각각의 diluted gas와 혼합하여 농도를 보정하였다. 일정 유량의 N₂ 및 dry air를 tedlar bag에 포집한 후 micro syringe (10 µl)를 이용하여 B.T.X.용액 적당량을 주입하고, tedlar bag내의 균일한 혼합을 얻기 위하여 magnetic stirrer 및 mixing chamber를 장치하여 충분한 혼합이 이루어질 수 있

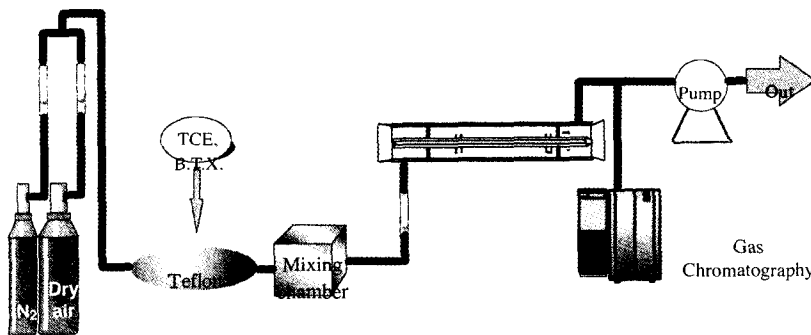


Fig. 1. Schematics diagram of experimental apparatus.

도록 구성하였다(Wang *et al.*, 1996). 아래에 모의가스 제조시 주입농도를 결정하는 식을 나타내었다.

$$C_{ppm} = 22.4 \times 10^6 \left(\frac{\rho V_L}{MV} \right) \left(\frac{T}{273} \right) \left(\frac{760}{P} \right)$$

- C : Concentration of Test gas (ppm)
- V : Volume of Tedlar bag (l)
- ρ : Density of liquid sample (g/ml)
- T : Temperature (K)
- M : Molecular weight of sample (g/mol)
- P : Pressure (mmHg)
- V_L : Volume of liquid sample (ml)

Test 가스의 농도는 B.T.X-물질에 따라 각각 20~300 ppm으로 제조되어 반응기로 유입되었다.

3.3 UV 광산화-TiO₂ 광촉매 반응부

UV 광산화-TiO₂ 광촉매 반응부는 실험 장치의 핵심부로 65w, 253.7 nm와 184.9 nm의 파장을 방사하는 저압 수은램프(G64T5VH-ozone lamp), 안정기, 180 nm 이상의 파장을 선별하여 방사시키기 위한 quartz filter tube (ϕ 30), 290 nm 이상의 파장을 선별하여 방사시키기 위한 pyrex filter tube (ϕ 30), TiO₂를 코팅시킨 스테인레스 tube, 그리고 직경 68 mm, 길이 180 mm의 pyrex 재질의 유리관으로 이루어져 있다. UV 광산화-TiO₂ 광촉매 반응부는 그림 2에 나타나 있다.

3.4 측정 및 분석

UV 반응기에서 생성되는 오존의 농도는 검지관식 가스측정기(실린더형 IRM)를 사용한 검지관법(Gastec 18 L range 0.025~3 ppm, 18 M range 4~400 ppm)으로 측정하였으며, 모의 대상 가스의 초기농도 및 처리후의 농도분석은 GC-FID(HP 6890 series)를 사용하여 측정하였다(Langleron, 1995).

4. 실험 결과

4.1 광산화 단독공정에 의한 TCE, B.T.X.의 전환율

4.1.1 TCE에 대한 광산화 전환율

유입 TCE의 농도를 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300 ppm으로 각각 제조하여 3회씩 반응기에 유입시키고 이 때 처리유량을 각각 0.5 LPM, 1 LPM, 2 LPM, 3 LPM으로 변환을 주었다. 그림 3에 각각의 유량에 대한 TCE 전환율을 도시하였다. 0.5 LPM에서는 100 ppm 이하의 농도에서 약 80% 이상의 전환율을 보였으며 1LPM에서는 100 ppm 이하의 농도에서 약 79% 이상의 전환율을, 2 LPM에서는 100 ppm 이하의 농도에서 약 80% 이상의 전환율을 나타내었으나 실험시 주위온도의 강하로 인하여 60 ppm 부근에서 전환율 감소를 보였다. 3 LPM에서는 100 ppm 이하의 농도에서 약 70% 이상의 전환율을 나타내어 처리유량 0.5 LPM, 1 LPM, 2 LPM을 각각 비교하여 볼 때 약

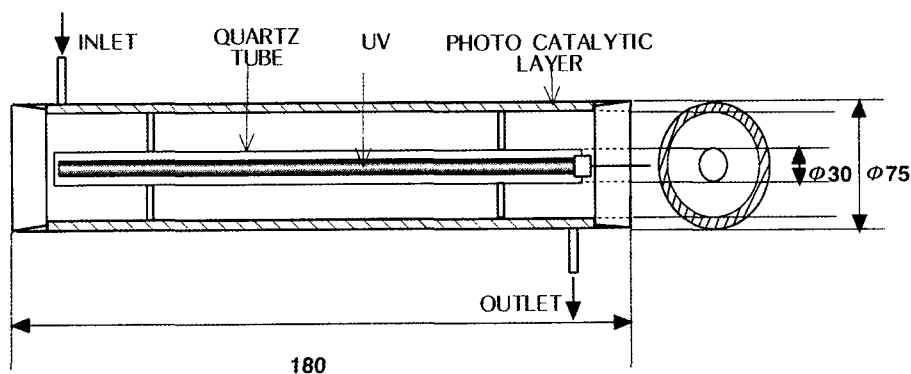


Fig. 2. UV photolysis-TiO₂ photocatalytic reactor.

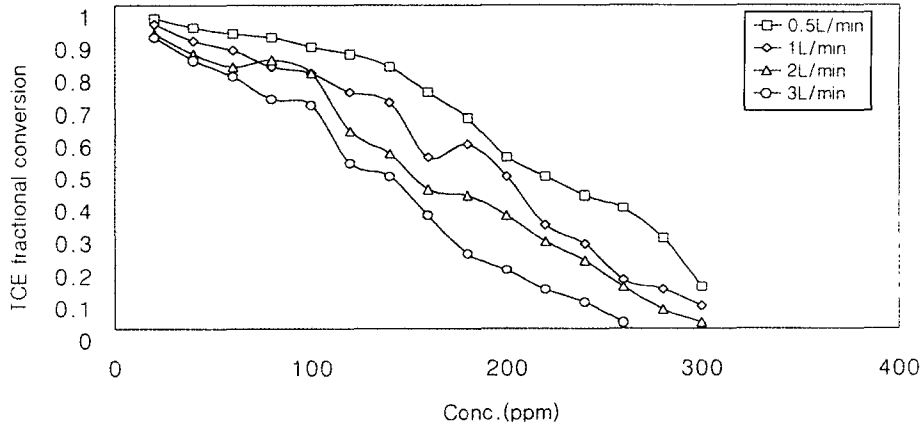


Fig. 3. TCE fractional conversion as a function of flowrate (Photolytic process).

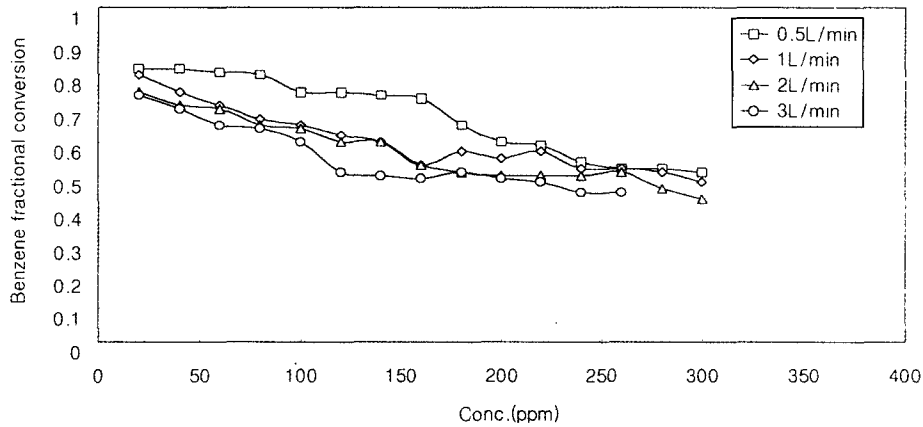


Fig. 4. Benzene fractional conversion as a function of flowrate (Photolytic process).

10%의 전환율 감소를 보였다. 200 ppm 이상의 농도에서는 50% 이하로 전환율의 급격한 감소 곡선을 나타내었으며 300 ppm에서는 유량에 관계없이 10% 전후의 전환율을 나타내고 있어 TCE가 고농도시 거의 처리되지 않음을 나타내고 있다. TCE의 전환율 실험에서는 본 장치의 조건에서 적정처리 유입 농도는 100 ppm 정도임을 알 수 있었으며 유량에 관계없이 80% 전후의 전환율을 나타내었다.

4. 1. 2 Benzene에 대한 광산화 전환율

TCE 외에 단일가스의 전환율 실험을 위하여 B.T.X.를 사용하였으며 우선, 유입 Benzene의 농도

를 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300 ppm으로 각각 제조하여 3회씩 반응기에 유입시키고 이 때 처리유량을 각각 0.5 LPM, 1 LPM, 2 LPM, 3 LPM으로 변화를 주어 전환율을 살펴 보았다. 그림 4에 각각의 유량에 대한 Benzene 전환율을 도시하였다. 0.5 LPM에서는 100 ppm 이하의 농도에서 약 75% 이상의 전환율을 보였으며 1 LPM에서는 100 ppm 이하의 농도에서 약 65% 이상의 전환율을 나타내었다. 처리유량 2 LPM, 100 ppm 이하의 농도에서 약 65% 이상의 전환율을, 3LPM, 100 ppm 이하의 농도에서 약 60% 이상의 전환율을 나타내어 약 10%의 전환율 감소를 보였다. 200

ppm 이상의 농도에서는 모든 유량에 대해서는 전환율의 급감이 없이 50% 정도의 전환율 나타내었다. 이것은 앞의 고농도시 TCE의 실험결과보다는 양호한 결과를 나타내고 있다. 본 실험에서 100 ppm 전후가 적정 처리범위임을 알 수 있었으며 이때 전환율은 60~80% 범위로 확인되었다.

4. 1. 3 Toluene에 대한 광산화전환율

Toluene 역시 TCE와 benzene과 동일한 조건으로 20~300 ppm의 범위에서 유량 0.5~3 LPM의 변화를 주어 전환율을 조사하였으며 그림 5에 도시하였다. Benzene과 동일 조건하에서 0.5 LPM, 100 ppm이

하의 농도에서 80%에 가까운 전환율을 보였으며, 1 LPM, 100 ppm 이하의 농도에서 약 69% 이상의 전환율을, 2 LPM, 100 ppm 이하의 농도에서 약 65% 이상의 전환율을, 3 LPM, 100 ppm 이하의 농도에서 약 60% 이상의 전환율을 나타내었다. 처리유량에 따라 전환율의 차이가 있었으나, 약 10%의 전환율 감소를 보였고 180 ppm 이상에서는 전환율의 급감현상이 나타났다. TCE와 마찬가지로 200 ppm 이상의 농도에서는 50% 이하로 전환율의 급격한 감소 곡선을 나타내었다.

이는 benzene과 toluene의 경우 매우 낮은 양자효율을 가지기 때문인 것으로 추정되며, toluene의 경

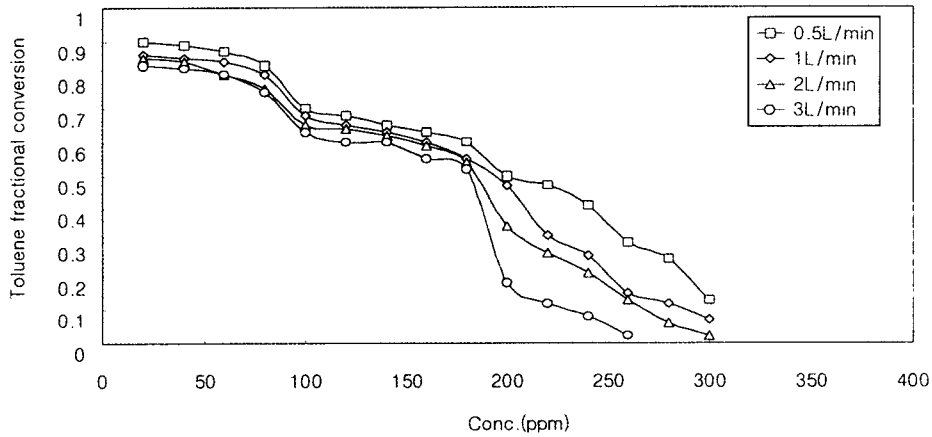


Fig. 5. Toluene fractional conversion as a function of flowrate (Photolytic process).

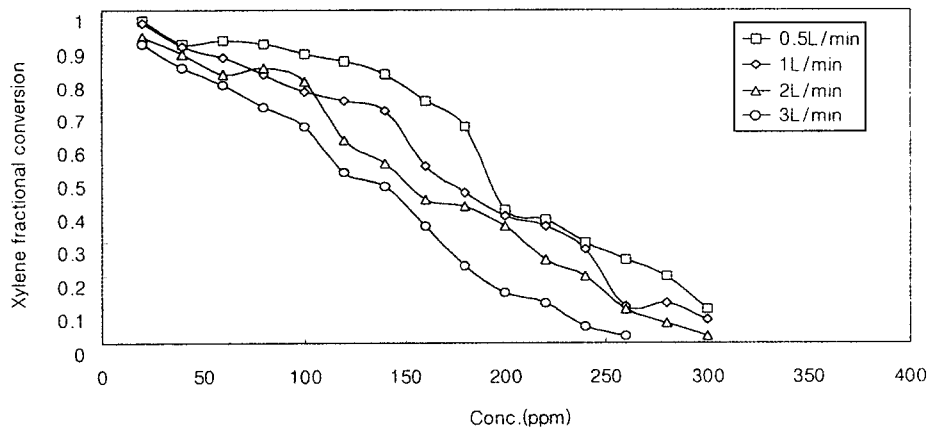


Fig. 6. Xylene fractional conversion as a function of flowrate (Photolytic process).

우는 benzene과는 다르게 농도가 증가할수록 전환율이 감소하는 전환율 곡선을 나타내었다.

4.1.4 유량에 따른 Xylene 전환율

동일 조건하에서 0.5 LPM, 100 ppm 이하의 농도에서 약 70% 이상의 전환율을 보였으며 1 LPM, 100 ppm 이하의 농도에서 약 89% 이상의 전환율을 나타내었으나 180 ppm 이상의 농도에서는 40% 이하로 전환율이 급격히 감소하였다. 2 LPM, 100 ppm 이하의 농도에서 약 79% 이상의 전환율을 나타내었으나 100 ppm 이상에서는 60% 이하의 전환율 감소

를 나타내었다. 3 LPM에서는 100 ppm 이하의 농도에서 약 67% 이상의 전환율을 나타내어 약 10%의 전환율 감소를 보였고 200 ppm 이상에서는 10% 이하의 전환율을 나타내었다.

4.2 오존 생성

본 반응기에 사용된 자외선 램프인 64W 저압수은램프에서는 주파장인 253.7 nm 외에 184.9 nm의 파장이 나오는데 이 파장은 공기 중의 산소를 분해하여 오존을 생성시키는 능력이 있다. 본 반응기에서 생성되는 오존에 대하여 검지관을 이용하여 측

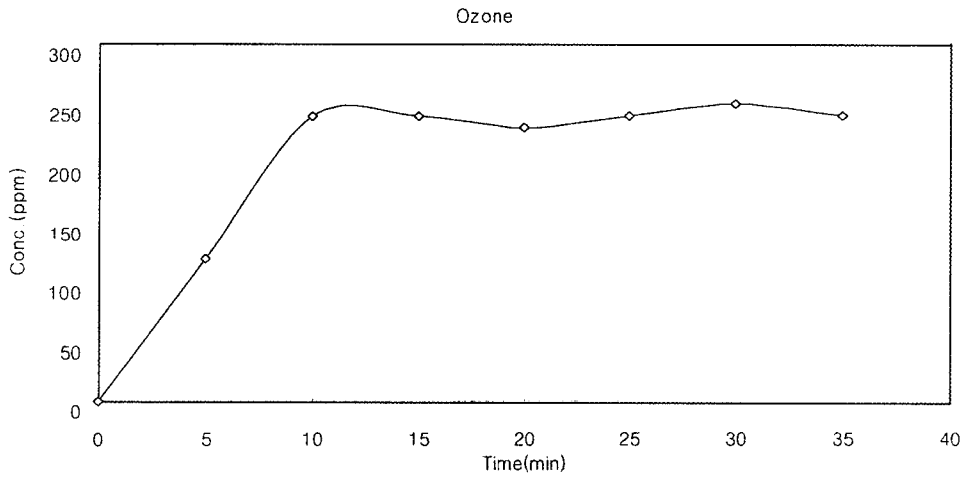


Fig. 7. Ozone generation as a function of time.

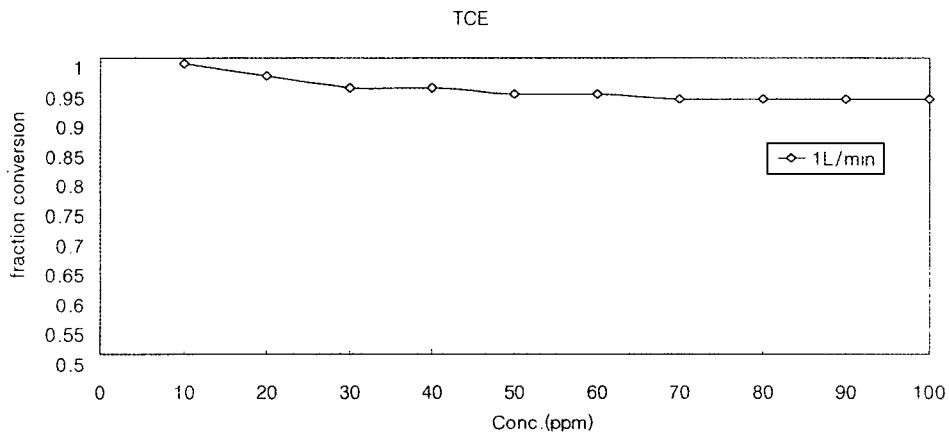


Fig. 8. TCE fractional conversion using Photolysis-Photocatalytic oxidation process (1 L/min).

정한 농도 그림을 그림 7에 나타내었다. 램프를 시동하면 오존이 시간에 대하여 비례적으로 증가하다가 10 min 이상에서는 농도 250 ppm에서 일정하게 유지되었다. 본 반응기에서 광산화 이외에 오존의 산화력을 이용하기 위하여서는 램프를 켜고 약 10분 이후에 실험을 수행하여야 한다. 본 실험에서 반응기의 초기 start-up시간은 10분이다.

4.3 광산화-광촉매 산화 혼합 공정에 의한 TCE 및 B.T.X 처리의 전환율

본 실험에서는 광산화공정과 광촉매 산화공정 장

점을 택하여 하나의 단독공정인 TiO₂-UV₂₅₄공정을 채택하여 두 공정에서 실험한 동일조건에서 TCE, benzene, toluene, xylene의 처리효율을 검토하였다. 64w 저압수은램프에 광학 석영 필터를 다시 설치하여 253.9 nm파장을 이용하고 광촉매를 이용하여 광촉매 산화공정 병용하였다. TCE, benzene, toluene, xylene의 유입농도를 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 ppm으로 각각 제조하여 반응기에 유입시키고 이 때 처리유량은 1 LPM으로 고정하여 실험하였다.

그림 8, 그림 9, 그림 10, 그림 11에 TCE, benzene.

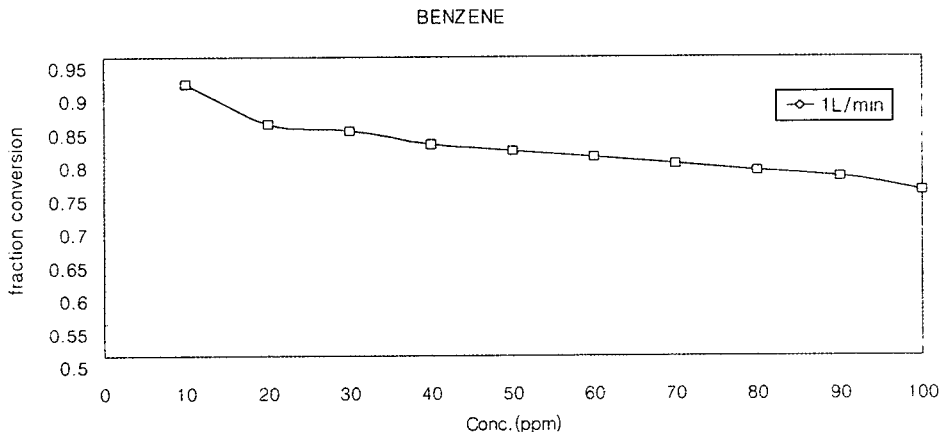


Fig. 9. Benzene fractional conversion using Photolysis-Photocatalytic oxidation process (1 L/min).

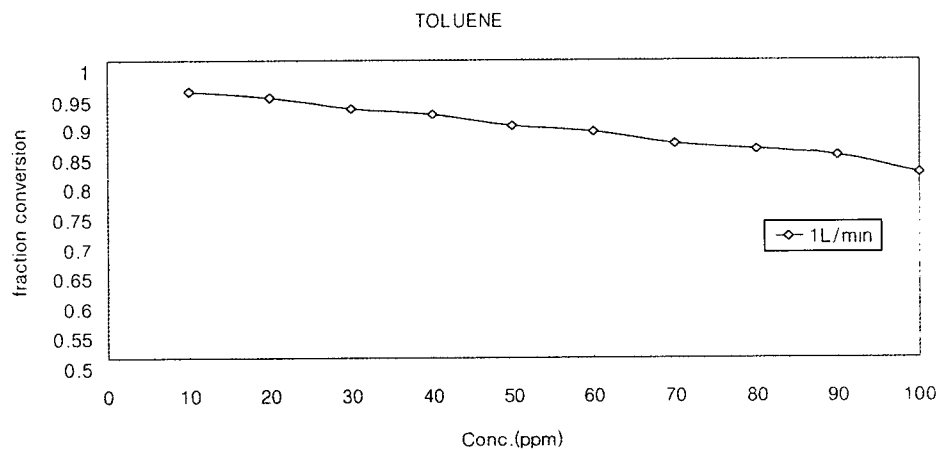


Fig. 10. Toluene fractional conversion using Photolysis-Photocatalytic oxidation process (1 L/min).

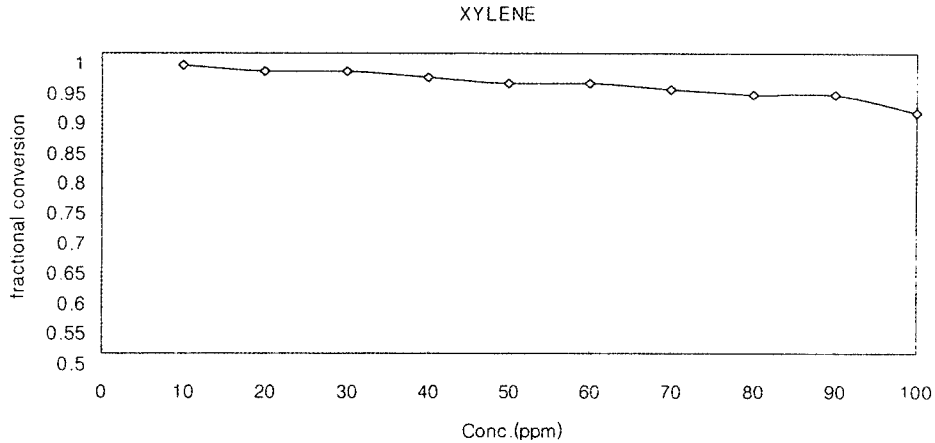


Fig. 11. Xylene fractional conversion using Photolysis-Photocatalytic oxidation process (1 L/min).

toluene, xylene의 광촉매 산화에 의한 전환율을 나타내었다.

TCE의 경우 100 ppm 이하의 농도에서 90% 이상의 전환율을 보이고 있으며 광산화 단독공정과 광촉매 단독공정 등과 비교하였을 때 광산화 공정보다는 10% 정도의 전환율 상승을 얻었으며 광촉매 산화 단독공정보다는 고농도에서 80% 이상의 전환율 상승결과를 얻었다.

Benzene의 경우에는 20 ppm 이하에서 85%의 전환율을 나타내었으며 100 ppm에서 약 75%의 전환율을 나타내었다. 전환율은 전반적으로 각각의 개별 공정과 비교하였을 때는 효율상승을 나타내었다. Toluene의 경우에는 40 ppm 이하에서 90% 이상의 전환율을 나타내었으며 100 ppm에서 82%의 전환율을 나타내었다. Xylene의 경우에는 100 ppm 이하에서 90% 이상의 전환율을 보였으며 가장 좋은 전환율을 나타내었다.

5. 결 론

본 연구는 UV 광산화 반응과 광촉매 산화공정을 이용하여 산업공정에서 다양하게 배출되고 있는 트리클로로에틸렌(TCE)과 벤젠, 톨루엔, 자일렌의 처리에 있어서 각 물질의 처리효율에 미치는 여러 가지 영향인자에 대한 고찰을 시도하였으며, UV 광산

화와 광촉매에 의한 반응기의 운전성능을 향상시킬 수 있는 조건을 도출하기 위한 실험을 수행하였다. 또한 UV 광산화 단독공정과 광산화-광촉매 복합공정의 처리효율을 비교하였다.

1. 이론적 설계인자로서 처리 농도 100 ppm, 유량 1LPM, 체류시간 4.9분으로 본 장치의 설계기준에 잘 따르는 물질은 TCE와 xylene이며 양자효율이 다소 낮은 benzene, toluene을 처리하기 위해서는 자외선 강도의 증가나 체류시간의 증가 등 본 장치보다 강화된 시스템이 필요한 것으로 사료된다.

2. UV 광산화 단독공정에서는 각 물질의 농도를 100 ppm으로 주입(유량 1 l/min)한 결과 benzene, toluene, xylene 각각 65%, 68%, 76% 이상의 처리효율을 나타내었으며, TiO₂ 광촉매 단독공정에서는 30 ppm 이상에서 급격한 처리효율의 감소를 나타내었다.

3. TiO₂ 광촉매 공정의 단점을 보완하기 위해서 실시된 UV 광산화-TiO₂ 광촉매 산화 복합공정의 실험에서 benzene, toluene, xylene 각각 75%, 81%, 90% 이상의 처리효율을 나타내어 UV광산화 단독공정시보다 처리효율이 10% 이상 증가함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

조정구(1999) Non-Thermal 플라즈마를 이용한 B.T.X.의

동시처리, 동아대학교 박사학위 논문.

- Glaze, H.W., J.F. Kenneke, and J.L. Ferry (1993) Chlorinated byproducts from the TiO_2 -Mediated photodegradation of trichloroethylene and tetrachloroethylene in water, *Journal of Environmental Science & Technology*, (27)1, 177-184.
- Haag, R.W. and D.M. Johnson (1996) Direct photolysis of trichloroethane in air, *J. of Environmental Science & Technology*, 30(2), 414-421.
- Langleron, M. (1995) Study by mass spectrometry and gas chromatography of toluene oxidation in a low-pressure plasma reactor, *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, (9), 18-22.
- Mao, Y., C. Schöneich, and K.D. Asmus (1993) Radical mediated degradation mechanisms of halogenated organic compounds as studied by photocatalysis at TiO_2 and by radiation chemistry, *Photocatalytic Purification and Treatment of Water and Air*, 49-66.
- Okamura Kazuo, Yoshida Katsuhiko, Hirano Kouji, Iguchi Kiyoshi, Itoh Kiminori, and Murabayashi Masayuki (1994) Decomposition of trichloroethylene in water by using aeration and gas-phase photoreaction, *J. Japan Soc. on Water Environment*, 17(4), 270-275.
- Uchida Hiroyuki, Katoh Shinobu, and Watanabe Masahiro (1998) Photocatalytic degradation of trichlorobenzene using immobilized TiO_2 films containing poly(tetrafluoroethylene) and platinum metal catalyst, *Electrochemical Acta.*, (43), 2111-2116.
- Wang Yan, Raihala S. Tyler, Jackman P. Alan, and St. John Richard (1996) Use of Tedlar bags in VOC testing and storage: Evidence of significant VOC losses, *Environmental Science Technology*, (30)13, 3115-3117.